

# 四绕组感应滤波变压器短路阻抗特性研究

石赛美<sup>1</sup>, 黄肇<sup>1</sup>, 张贻文<sup>2</sup>

(1. 邵阳学院电气工程学院, 湖南 邵阳 422000; 2. 国网湖南省电力有限公司邵阳供电公司, 湖南 邵阳 422000)

**摘要:** 短路阻抗是四绕组感应滤波变压器的重要技术参数, 它不仅影响变压器的稳态运行、短路电流计算, 而且会涉及到感应滤波效果。首先提出一种感应解耦法以建立四绕组感应滤波变压器的电压方程; 然后基于短路法分析四绕组感应滤波变压器的短路阻抗特性以及滤波器阻抗对短路阻抗的影响; 最后通过短路实验验证所述的理论与计算方法的正确性。结果表明滤波绕组的等效阻抗为零, 满足感应滤波约束条件, 且滤波器的阻抗参数对短路阻抗无任何影响。

**关键词:** 四绕组感应滤波变压器; 短路阻抗; 感应解耦模型; 滤波器

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.020 中图分类号: TM72, TM41 文章编号: 1673-9140(2020)05-0144-06

## Research on the short-circuit impedance characteristics of a four winding induction filtering transformer

SHI Saimei<sup>1</sup>, HUANG Zhao<sup>1</sup>, ZHANG Yiwen<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Shaoyang University, Shaoyang 422000, China; 2. Shaoyang Power Supply Company, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Shaoyang 422000, China)

**Abstract:** The short-circuit impedances are important technical parameters for a four-winding induction filtering transformer (FW-IFT), which not only affects the steady-state operation and short-circuit current calculation, but also involves the effect of induction filtering. In this paper, an induction decoupling method is proposed to establish the voltage equation of four winding induction filter transformer. Then, based on the short-circuit method, the short-circuit impedance characteristics of four winding induction filter transformer and influences of filter impedance on the short-circuit impedances are analyzed on the basis of the three-phase short-circuit method. Finally, a short-circuit experiment is included to verify the correctness of the theory and calculation method. It is shown that the equivalent impedance of the filter winding is zero, which meets the constraints of the inductive filter. Meanwhile, the impedance parameters of the filter have no influences on the short-circuit impedance.

**Key words:** four-winding inductive filtering transformer; short-circuit impedance; inductive decoupling model; filters

近年来, 大功率的换流器、工业整流装置以及电弧炉等非线性设备的使用, 向配电网注入了谐波电

流, 导致电力系统的电能质量问题、谐波污染和电磁干扰问题日益严重<sup>[1-2]</sup>。为了提高电网质量, 一种新

型的用于改善公用电网的供电质量,以及提高网侧供电功率因数的四绕组感应滤波变压器得到广大科研人员的关注。基于感应滤波原理构成的四绕组感应滤波变压器可屏蔽非线性负荷所产生的谐波电流而无法感应到公共电网,起到无功补偿与谐波抑制作用,主要用于负荷谐波较重的高压变电站、风电场并网和光伏发电并网的场所。

在电力系统中,短路阻抗是变压器的重要技术参数,可构成变压器的等效模型,并通过它计算短路电流、变压器的电压降及功率损耗<sup>[3-5]</sup>。文献[6-8]推导多绕组变压器等值电路的形成以及短路阻抗的计算条件和方法,在此基础上得到感应滤波变压器短路阻抗等值电路模型;文献[9]构建四绕组感应滤波变压器各绕组的端口模型,并建立变压器各绕组的端口电压方程。该文主要研究四绕组感应滤波变压器的阻抗特性以及分析滤波器阻抗是否对短路阻抗值有影响。首先依据四绕组感应滤波变压器的等值电路建立其端口电压方程;然后在端口电压方程的基础上通过短路法研究四绕组感应滤波变压器的短路阻抗特性,分析滤波器的阻抗参数对四绕组感应滤波变压器的短路阻抗值的影响;最后,以一台型号为 SGL-10/0.4 的四绕组感应滤波变压器样机为例,通过实验证明所述理论计算与分析的正确性。

### 1 端口电压方程

四绕组感应滤波变压器应用在高压变电站的主电路拓扑结构如图 1 所示。该系统主要由四绕组感应滤波变压器、无源滤波器和非线性负荷组成。四绕组感应滤波变压器分别由一次绕组(高压侧)、二次绕组(低压侧)、三次绕组(中压侧)和感应滤波绕组(滤波侧)等 4 个绕组组成。四绕组感应滤波变压器具有特殊的绕组接线方式,一次绕组为星形联结,并与 220 kV 交流电网相连接;二次绕组为星形联结,并与 110 kV 负荷相连接;三次绕组为三角形联结,并与 35 kV 负荷相连接和感应滤波绕组为三角形联结,并与电容器、滤波器相连接构成感应滤波系统。

图 2 给出了四绕组感应滤波变压器的单相等值电路模型,图中,  $Z_{Kmn}$  为  $m$  绕组与  $n$  绕组之间的短

路阻抗;  $Z_{Kk,mn}$  为  $m$ 、 $n$  绕组与  $k$  绕组关联的等效阻抗;  $U_{a1}$ 、 $U_{a2}$ 、 $U_{a3}$  和  $U_{a4}$  分别为变压器各绕组 a 相的相电压;  $I_{a1}$ 、 $I_{a2}$ 、 $I_{a3}$  和  $I_{a4}$  分别为变压器各绕组 a 相的相电流。上标(1)表示各电气参数归算到高压侧。

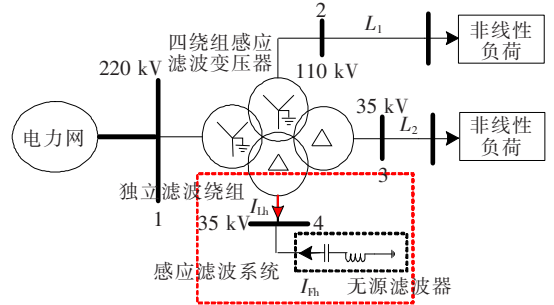


图 1 四绕组感应滤波变压器应用在高压变电站的主电路

Figure 1 Main circuit diagram of the FW-IFT applied in high-voltage substation

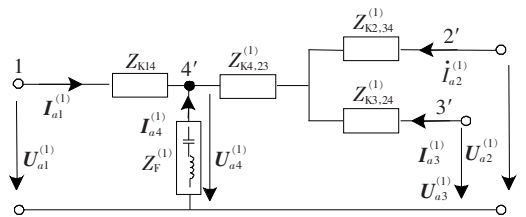


图 2 单相等值电路模型

Figure 2 Single-phase equivalent circuit model

若忽略励磁电流,根据变压器安匝平衡原理,可得到磁势平衡方程:

$$I_{a4}^{(1)} = -(I_{a1}^{(1)} + I_{a2}^{(1)} + I_{a3}^{(1)}) \quad (1)$$

感应滤波系统的滤波支路电压方程:

$$U_{a4}^{(1)} = Z_F^{(1)} I_{a4}^{(1)} = -Z_F^{(1)} (I_{a1}^{(1)} + I_{a2}^{(1)} + I_{a3}^{(1)}) \quad (2)$$

式中  $Z_F$  为滤波器的阻抗参数。

假设是三相对称系统,列写 a 绕组电压方程:

$$\begin{cases} U_{a1}^{(1)} - U_{a4}^{(1)} = Z_{K14}^{(1)} I_{a1}^{(1)} \\ U_{a2}^{(1)} - U_{a4}^{(1)} = Z_{K24}^{(1)} I_{a2}^{(1)} + Z_{K4,23}^{(1)} I_{a3}^{(1)} \\ U_{a3}^{(1)} - U_{a4}^{(1)} = Z_{K4,23}^{(1)} I_{a2}^{(1)} + Z_{K34}^{(1)} I_{a3}^{(1)} \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} Z_{K2,34} = 0.5(Z_{K24} + Z_{K23} - Z_{K34}) \\ Z_{K3,24} = 0.5(Z_{K34} + Z_{K23} - Z_{K24}) \\ Z_{K4,23} = 0.5(Z_{K24} + Z_{K34} - Z_{K23}) \end{cases} \quad (4)$$

式(1)、(2)代入式(3),推导出在基波与谐波下四绕组感应滤波变压器 a 绕组电压方程:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{a1}^{(1)} = (Z_{K14}^{(1)} - Z_F^{(1)})\mathbf{I}_{a1}^{(1)} - Z_F^{(1)}\mathbf{I}_{a2}^{(1)} - Z_F^{(1)}\mathbf{I}_{a3}^{(1)} \\ \mathbf{U}_{a2}^{(1)} = -Z_F^{(1)}\mathbf{I}_{a1}^{(1)} + (Z_{K24}^{(1)} - Z_F^{(1)})\mathbf{I}_{a2}^{(1)} + (Z_{K4,23}^{(1)} - Z_F^{(1)})\mathbf{I}_{a3}^{(1)} \\ \mathbf{U}_{a3}^{(1)} = -Z_F^{(1)}\mathbf{I}_{a1}^{(1)} + (Z_{K4,23}^{(1)} - Z_F^{(1)})\mathbf{I}_{a2}^{(1)} + (Z_{K34}^{(1)} - Z_F^{(1)})\mathbf{I}_{a3}^{(1)} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)描述了在基波与谐波条件下四绕组感应滤波变压器的各端口电压方程组,推导出短路阻抗与滤波器阻抗之间的数学表达式,可用于分析在基波下投切滤波器时滤波器阻抗对四绕组感应滤波变压器短路阻抗的影响。

## 2 短路阻抗的理论分析

通过三相短路法可以测量出四绕组感应滤波变压器的短路阻抗。当绕组 1 施加电压、绕组 2 三相短路而绕组 3、4 开路时,可以测量出短路阻抗  $Z_{K12}$ ,可以通过同理方法测量出其他的短路阻抗  $Z_{K13}$ 、 $Z_{K14}$ 、 $Z_{K23}$ 、 $Z_{K24}$  和  $Z_{K34}$ 。在研究滤波器阻抗对短路阻抗参数的影响时,四绕组感应滤波变压器的滤波支路需连接无源滤波器,主要研究对短路阻抗  $Z_{K12}$  和  $Z_{K13}$  的影响。

当网侧绕组 1 施加电压,中/低压侧绕组分别三相短路时,从端口方程建立了网侧电压与电流理论表达式,并推导出短路阻抗  $Z_{K12}$  和  $Z_{K13}$  与其他短路阻抗之间的关系。然后,在此基础上分别投切感应滤波器,深入讨论滤波器阻抗对四绕组感应滤波变压器短路阻抗的影响。

### 2.1 短路阻抗 $Z_{K12}$ 的理论分析

四绕组感应滤波变压器采用三相测量法计算网侧绕组 1 与中压侧绕组 2 间的短路阻抗  $Z_{K12}$  的原理如图 3 所示。参照测量短路阻抗的方法,当网侧绕组 1 施加电压,中压侧绕组 2 直接短路,低压侧绕组 3 和滤波绕组 4 开路时,测量短路阻抗  $Z_{K12}$ 。然后滤波绕组 4 接入滤波器时,分析滤波器阻抗  $Z_F$  对短路阻抗  $Z_{K12}$  的影响。

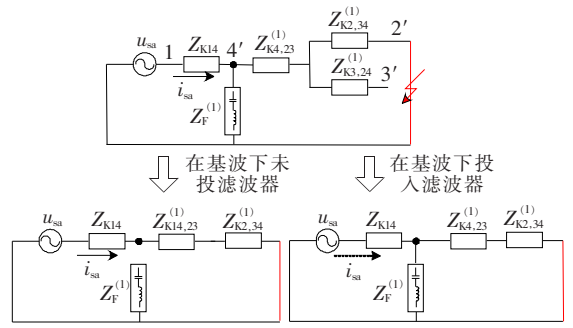


图 3 测量短路阻抗  $Z_{K12}$  接线

Figure 3 Wiring diagram for measuring short-circuit impedance  $Z_{K12}$

中压侧绕组 2 三相短路时,满足:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{a2}^{(1)} = \mathbf{U}_{b2}^{(1)} = \mathbf{U}_{c2}^{(1)} = 0 \\ \mathbf{I}_{a3}^{(1)} = \mathbf{I}_{b3}^{(1)} = \mathbf{I}_{c3}^{(1)} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式(6)代入(5)可得

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{a1}^{(1)} = (Z_{K14}^{(1)} - Z_F^{(1)})\mathbf{I}_{a1}^{(1)} - Z_F^{(1)}\mathbf{I}_{a2}^{(1)} \\ Z_F^{(1)}\mathbf{I}_{a1}^{(1)} = (Z_{K24}^{(1)} - Z_F^{(1)})\mathbf{I}_{a2}^{(1)} \\ u_{sa1} = \mathbf{U}_{a1}^{(1)}; i_{a1} = \mathbf{I}_{a1}^{(1)} \end{cases} \quad (7)$$

在式(7)消除中间变量  $\mathbf{I}_{a2}^{(1)}$ ,得

$$Z_{K12} = \frac{u_{sa}}{i_{a1}} = Z_{K14}^{(1)} - \frac{Z_{K24}^{(1)}Z_F^{(1)}}{Z_{K24}^{(1)} - Z_F^{(1)}} \quad (8)$$

情形 1:在基波下,未投入滤波器时,  $Z_F^{(1)} = \infty$ ,由式(8)可知

$$Z_{K12,f} = Z_{K14}^{(1)} + Z_{K24}^{(1)} \quad (9)$$

情形 2:在基波下,投入滤波器时,  $Z_F^{(1)} \neq \infty$ ,但是滤波器阻抗值远远大于四绕组感应滤波变压器的短路阻抗值,于是存在:

$$|Z_F^{(1)}| \gg Z_{K24}^{(1)} \quad (10)$$

式(10)代入式(8)可得

$$Z_{K12-if} \approx Z_{K14}^{(1)} + Z_{K24}^{(1)} \quad (11)$$

其中,下标 f 表示在基波下未投入滤波器的情况,下标 if 表示在基波下投入滤波器的情况。

### 2.2 短路阻抗 $Z_{K13}$ 的理论分析

四绕组感应滤波变压器采用三相测量法计算网侧绕组 1 与低压侧绕组 3 间的短路阻抗  $Z_{K13}$  的原理如图 4 所示。参照测量短路阻抗的方法,当网侧绕组 1 施加电压,低压侧绕组 3 直接短路,中压侧绕组 2 和滤波绕组 4 开路时,测量出短路阻抗  $Z_{K13}$ 。然后滤波绕组 4 接入滤波器时,分析滤波器阻抗  $Z_F$  对短路阻抗  $Z_{K13}$  的影响。

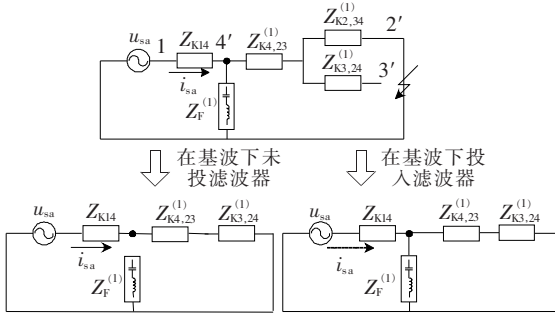


图 4 测量短路阻抗  $Z_{K13}$  接线

Figure 4 Wiring diagram for measuring short-circuit impedance  $Z_{K13}$

低压侧绕组 3 对称短路时, 所以满足:

$$\begin{cases} I_{a2}^{(1)} = I_{b2}^{(1)} = I_{c2}^{(1)} = 0 \\ U_{a3}^{(1)} = U_{b3}^{(1)} = U_{c3}^{(1)} = 0 \end{cases} \quad (12)$$

式(12)代入式(5)可得

$$\begin{cases} U_{a1}^{(1)} = (Z_{K14}^{(1)} - Z_F^{(1)}) I_{a1}^{(1)} - Z_F^{(1)} I_{a3}^{(1)} \\ Z_F^{(1)} I_{a1}^{(1)} = (Z_{K34}^{(1)} - Z_F^{(1)}) I_{a3}^{(1)} \end{cases} \quad (13)$$

在式(13)消除中间变量  $I_{a3}^{(1)}$  得

$$Z_{K13} = \frac{u_{sa}}{i_{a1}} = Z_{K14}^{(1)} - \frac{Z_{K34}^{(1)} Z_F^{(1)}}{Z_{K34}^{(1)} - Z_F^{(1)}} \quad (14)$$

情形 1: 在基波下, 未投入滤波器时,  $Z_F^{(1)} = \infty$ ,

由式(14)可知

$$Z_{K13-f} = Z_{K14}^{(1)} + Z_{K34}^{(1)} \quad (15)$$

情形 2: 在基波下, 投入滤波器时,  $Z_F^{(1)} \neq \infty$ ,

但是滤波器阻抗值远远大于四绕组感应滤波变压器的短路阻抗值, 于是存在:

$$|Z_F^{(1)}| \gg Z_{K34}^{(1)} \quad (16)$$

式(16)代入式(14)可得

$$Z_{K13-if} \approx Z_{K14}^{(1)} + Z_{K34}^{(1)} \quad (17)$$

根据以上推导, 由式(9)、(15)可知, 短路阻抗  $Z_{K12-f}$ 、 $Z_{K13-f}$  满足感应滤波的条件, 四绕组感应滤波变压器能实现感应滤波。而由式(11)、(17)可知, 短路阻抗  $Z_{K12-if}$ 、 $Z_{K13-if}$  也满足感应滤波的条件, 从理论上证明滤波器阻抗对短路阻抗  $Z_{K12-if}$ 、 $Z_{K13-if}$  无任何影响。

通过短路试验能测量出变压器短路阻抗  $Z_{K12}$ 、 $Z_{K13}$ 、 $Z_{K14}$ 、 $Z_{K23}$ 、 $Z_{K24}$ 、 $Z_{K34}$ 。通过式(9)与式(11)、式(15)与式(17)理论计算的对比, 可以进一步验证短路阻抗  $Z_{K12-f}$  与  $Z_{K12-if}$ 、 $Z_{K13-f}$  与  $Z_{K13-if}$  的值相差甚小, 说明滤波器的阻抗对感应滤波变压器的短路阻抗值无影响。

### 3 模型与实验验证

制造一台型号为 SGL-10/0.4 的四绕组感应滤波变压器样机。采用 11 次无源滤波器, 滤波器参数  $L_F = 3 \text{ mH}$ ,  $C_F = 28 \mu\text{F}$ , 在基波下的滤波器阻抗  $Z_F = 0 - j112.8 \Omega$ 。图 5 给出了对原理样机进行短路实验的实物图, 测量短路阻抗以及滤波器阻抗对短路阻抗的影响, 表 1 给出了感应滤波变压器的原理样机参数。

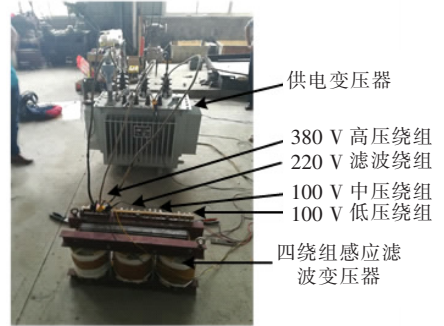


图 5 原理样机的短路实验

Figure 5 Short-circuit test prototype

表 1 原理样机的基本参数

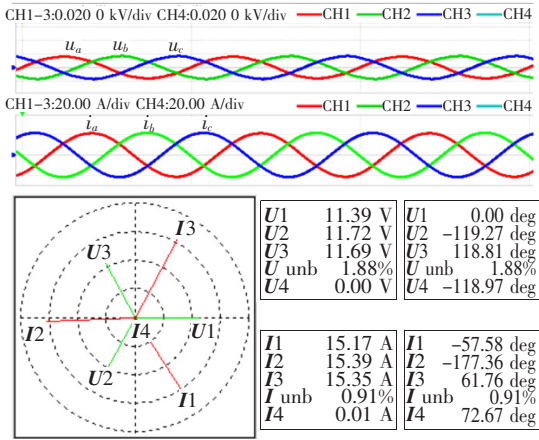
Table 1 Basic parameters of prototype

对应绕组	额定容/(kV·A)	额定电压/V	额定电流/A	匝数	联结方式	绕组电阻/ $\Omega$
一次绕组	10	380	15.19	122	YN	0.230 56
二次绕组	10	100	57.73	32	yn0	0.012 14
三次绕组	10	100	57.73	55	d11	0.030 37
滤波绕组	10	220	26.31	122	d11	0.055 02

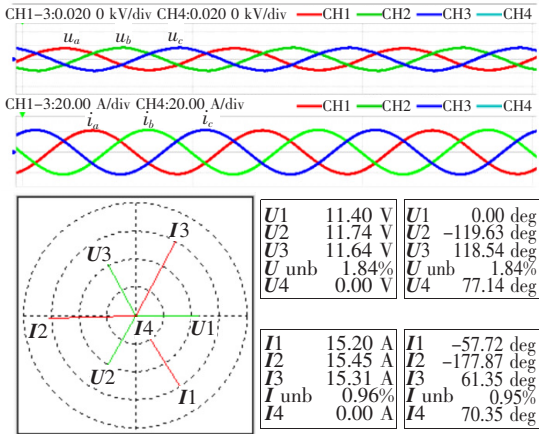
通过短路实验测量出样机短路时的电压电流参数, 经过折算可得到短路阻抗的复数值为  $Z_{K14} \% = 2.84 \angle 45.9^\circ$ ,  $Z_{K24} \% = 2.265 \angle 45.3^\circ$ ,  $Z_{K23} \% = 2.312 \angle 15.6^\circ$ ,  $Z_{K34} \% = 2.765 \angle 59.8^\circ$ 。

#### 3.1 短路阻抗 $Z_{K12}$ 的实验结果

实测短路阻抗  $Z_{K12}$  的网侧电压和电流的波形及矢量如图 6 所示, 其中, 图 6(a) 是未投滤波器 ( $Z_F = \infty$ ) 时网侧电压和电流的波形及矢量图; 图 6(b) 是投入滤波器 ( $Z_F = 0 - j112.8 \Omega$ ) 时网侧电压和电流的波形和矢量图。表 2 给出了短路阻抗  $Z_{K12}$  理论计算结果与实验结果对比。



(a)未投滤波器时网侧电压、电流波形及矢量图



(b)投入滤波器时网侧电压、电流波形及矢量图

图 6 实测  $Z_{K12}$  的网侧电压、电流波形和矢量图

Figure 6 Voltages and currents waveform and vector on the utility grid side by measured  $Z_{K12}$

表 2 短路阻抗  $Z_{K12}$  % 结果对比

Table 2 Comparison of  $Z_{K12}$  % results

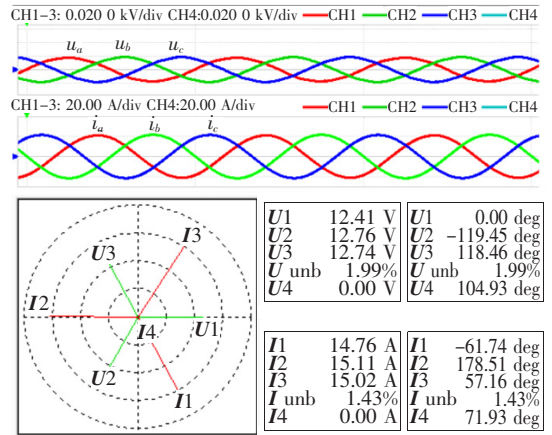
$Z_F/\Omega$	理论计算	实验结果
$\infty$	$5.104\angle 45.6^\circ$	$5.103\angle 45.7^\circ$
$-j112.8$	$5.105\angle 45.6^\circ$	$5.106\angle 45.7^\circ$

由图 6 可知,在基波下未投入与投入滤波器的短路实验中发现:实测短路阻抗  $Z_{K12}$  的网侧电压和电流的有效值和相角基本一致。由表 2 可知,理论计算结果与实验结果的数值基本一致,从而说明滤波器基波阻抗  $Z_F$  对短路阻抗  $Z_{K12}$  无影响。

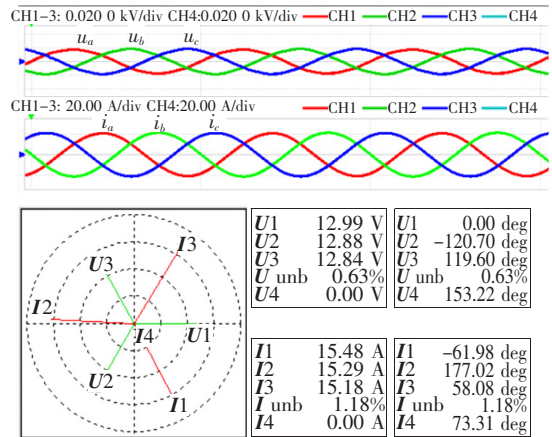
### 3.2 短路阻抗 $Z_{K13}$ 实验结果

实测短路阻抗  $Z_{K13}$  的网侧电压和电流的波形和矢量如图 7 所示,其中,图 7(a)是未投滤波器 ( $Z_F = \infty$ ) 时网侧电压和电流的波形及矢量图;图 7(b)是投入滤波器 ( $Z_F = 0 - j112.8 \Omega$ ) 时网侧电压

和电流的波形及矢量图。表 3 给出了短路阻抗  $Z_{K13}$  的理论计算与实验结果对比。



(a)未投滤波器时网侧电压、电流波形和矢量图



(b)投入滤波器时网侧电压、电流波形和矢量图

图 7 实测  $Z_{K13}$  的网侧电压、电流波形和矢量图

Figure 7 Voltages and currents waveform and vector on the utility grid side by measured  $Z_{K13}$

表 3 短路阻抗  $Z_{K13}$  % 结果对比

Table 3 Comparison of  $Z_{K13}$  % results

$Z_F/\Omega$	理论计算	实验结果
$\infty$	$5.563\angle 52.8^\circ$	$5.564\angle 52.8^\circ$
$-j112.8$	$5.565\angle 52.7^\circ$	$5.566\angle 52.8^\circ$

由图 7 可知,在基波下未投入与投入滤波器的短路实验中发现:实测短路阻抗  $Z_{K13}$  的网侧电压和电流的有效值和相角基本一致。由表 3 可知,理论计算结果与实验结果的数值基本一致,从而说明滤波器基波阻抗对短路阻抗无影响。

## 4 结语

该文依据四绕组感应滤波变压器的感应滤波条

件及等值电路,建立了主电路端口电压方程。基于短路法证明高一中短路阻抗  $Z_{K12}$  和高一低短路阻抗  $Z_{K13}$  与其它 4 个独立短路阻抗存在两组等式方程,推导出与滤波绕组关联的两组等值计算阻抗为零的特征,从而说明双组感应滤波变压器满足感应滤波条件。通过理论分析和样机实验验证了滤波器的基波阻抗参数对感应滤波变压器短路阻抗值几乎无影响,为后续建立感应滤波变压器的潮流计算和短路计算模型提供了充分条件。

### 参考文献:

- [1] 舒朝君,王亚,崔浩,等. 基于互信息的配电网多谐波源识别方法[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(1):16-21.  
SHU Chaojun, WANG Ya, CUI Hao, et al. Multi-harmonic sources identification method for distribution network based on mutual information [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(1): 16-21.
- [2] 王树民,李祥生,齐凌成,等. 并联型有源电力滤波器的研究[J]. 智慧电力,2018,46(9):79-82+102.  
WANG Shumin, LI Xiangsheng, QI Lingcheng, et al. Study on active power filter[J]. Smart Power, 2018, 46(9): 79-82+102.
- [3] 段振锋,付鹏武,吴佳芳,等. 基于耦合漏感的四绕组变压器暂态模型及短路计算[J]. 电力自动化设备,2019,38(4):110-117.  
DUAN Zhenfeng, FU Pengwu, WU guifang, et al. Transient model and short circuit calculation of four-winding transformer based on coupling leakage inductance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 38(4): 110-117.
- [4] 尹忠东,魏文思,王萍,等. 考虑集肤效应和邻近效应的变压器绕组谐波损耗计算及实验研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(4):143-151.  
YIN Zhongdong, WEI Wensi, WANG Ping, et al. Calculation and experimental study on harmonic loss of transformer windings considering skin effect and proximity effect[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 143-151.
- [5] 赵争菡,汪友华,凌跃胜,等. 大容量高频变压器绕组损耗的计算与分析[J]. 电工技术学报,2014,29(5):261-264+270.  
ZHAO Zhenghan, WANG Youhua, LING Yuesheng, et al. Calculation and analysis of loss in high-capacity high-frequency transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 261-264+270.
- [6] 王灿,罗隆福,周冠东. 具有滤波功补绕组整流变压器的等值电路计算[J]. 湖南大学学报:自然科学版,2014,41(10):67-70.  
WANG Can, LUO Longfu, ZHOU Guandong. Calculation of the equivalent circuit of rectifier transformer with additional filtering and power compensating winding [J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2014, 41(10): 67-70.
- [7] 罗隆福,张志文,邓建国,等. 多绕组变压器复合短路阻抗的求解方法[J]. 电工技术学报,2002,17(3):39-42.  
LUO Longfu, ZHANG Zhiwen, DENG Jianguo, et al. The method solving composite short-circuit impedance of multi-winding transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2002, 17(3): 39-42.
- [8] 朱永强,郝嘉诚. 多绕组变压器具有辐射形等值电路的充分必要条件[J]. 华北电力大学学报:自然科学版,2016,43(6):13-19.  
ZHU Yongqiang, HAO Jiacheng. The necessary and sufficient conditions of multi-winding transformer generating radiant equivalent circuit[J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Sciences, 2016, 43(6): 13-19.
- [9] 黄肇,罗隆福,李勇,等. 基于端口模型研究四绕组感应滤波变压器的运行特性[J]. 中国电机工程学报,2019,39(22):6706-6716.  
HUANG Zhao, LUO Longfu, LI Yong, et al. Research on the operating characteristics of four-winding inductive filtering transformer based on the port model[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6706-6716.